

## 気泡噴流水混合容器内の三次元粒子運動のPTV計測

山本 富士夫\*<sup>1</sup> 植村 知正\*<sup>2</sup> 井口 学\*<sup>3</sup> 森田 善一郎\*<sup>3</sup>  
臼井 尚\*<sup>2</sup> 太田 淳一\*<sup>1</sup> 和田 存功\*<sup>4</sup>

### PTV Measurement of a Three-Dimensional Particle Motion in a Bubbling Jet Mixing Water Vessel

Fujio YAMAMOTO, Tomomasa UEMURA, Manabu IGUCHI, Zen-ichiro MORITA,  
Takashi USUI, Junichi OHTA, and Ari-isa WADA

(Received Feb. 26, 1993)

The present paper proposes a new stereo pair matching technique with correction of light refraction at water-air boundary using two video pictures and a new particle tracking algorithm for three-dimensional particle-tracking velocimetry (3D PTV) based on a cross-correlation method using two-consecutive-time-step binary pictures. The technique of 3D PTV is applied to measure three-dimensional velocity vectors of tracer particle motion in a cylindrical water vessel with a bottom blowing bubbling jet. The performance of stereo pair matching and the measurement results of the bubble-water two-phase flows are discussed, and as a result the proposed technique is shown to be useful in measuring the three-dimensional bubbling jet flow field.

**Key Words:** Three-Dimensional Flow Measurement, Particle-Tracking Velocimetry, Image Processing, Binary Picture, Stereo Pair Matching, Cross-Correlation Method.

#### 1 緒言

流れの可視化とデジタル画像処理の技術を用いた粒子画像流速計測法(P I V)は、一定時間間隔の複数画面上のトレーサ粒子運動の解析により間接的に流体の流速を測定する方法である。その長所は、二次元または三次元流れの全流れ場を瞬時に無接触かつ高速に測定できるという点にある。しかし、その短所は、特別高級・高精度なシステムを使用しない限り、熱線風速計やL D Vといった点計測法と比べて、時間分解能が低く、かつ空間分解能も比較的劣るという点にある。

---

\*1 機械工学科, \*2 大阪大学基礎工学部, \*3 大阪大学工学部,

\*4 地域共同工学センター研究員(エイ・ダブリュ工業株式会社)

この十数年間で、二次元PIVに関する多くの報告が見られるようになった。その方法の一つに相関法がある<sup>(1)(2)</sup>。それは、パターン対応付けの評価に相互相関係数を用いて二つの連続画面内の粒子群密度の最類似分布パターン検出後、一定時間間隔の粒子群の変位と粒子速度ベクトルを計算する方法である。他の方法に、4時刻追跡法と呼ばれるものがある<sup>(3)~(6)</sup>。それは、粒子の変位と角度の分散(あるいは標準偏差)の最小値を与える最も滑かな粒子の軌道の検出により、四つの連続した時刻における各粒子の運動を追跡する方法である。植村らは、二値化相関法<sup>(7)~(10)</sup>と呼ばれる新しい方法を提案した。この方法は、二つの連続した画面内の各粒子の運動を追跡する。その原理は、二つの連続した二値化された画像の粒子の分布パターンの類似により、パターンの対応付けに相互相関係数を用いて各粒子の運動を追跡する。この方法は、粒子の追跡に高速アルゴリズムを持ち、速度ベクトルの算出が極めて短時間でできる特長を有する。植村らは、また、誤対応速度ベクトルを正対応速度ベクトル置き換えるダブルチェック法も提案した<sup>(11)</sup>。

近年、PIVは三次元流れ場の定量測定が要求される乱流の測定に応用されるようになった。4時刻追跡法による三次元PTVが開発され、攪拌容器内の等方性乱流の乱れエネルギー分布の研究を目的とした回転二重円筒の非定常流れの測定に応用されている<sup>(12)</sup>。

本論文では、2台のビデオカメラ画像を用いた水と空気を境界に持つ光の屈折の補正を加えた新しいステレオペアマッチングの方法と2時刻における二値化画像データを用いた相互相関法による三次元粒子画像流速測定法[Three-dimensional Particle Tracking Velocimetry(以下略して3DPTV)]の新しい粒子追跡のアルゴリズムを提案する。その3DPTV法を、底吹き気泡噴流を伴う円筒容器内のトレーサー粒子運動の三次元速度ベクトル測定に応用する。提案されるステレオペアマッチング法の性能と気泡噴流混合流れの気液二相流の3DPTV法による測定結果について検討を加え、その結果として、提案される方法が三次元流れ場の測定に有用であることを示す。

## 2 3DPTVの主要な3手順

3DPTVは次に述べる主要な三つの手順で構成される。

(1)流れ場は、流体の流れにトレーサーとして注入された小さな固体粒子により可視化され、流体流れの瞬時の粒子挙動の画像は2台または3台のCCD型ビデオカメラにより連続的に撮影される。

(2)各粒子の三次元( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )座標は、複数のカメラで同時に撮影された画面を用いたステレオペアマッチング法で決定される。

(3)各粒子は、時間間隔 $\Delta t$ を持つ第1空間と第2空間で追跡すなわち同定される。

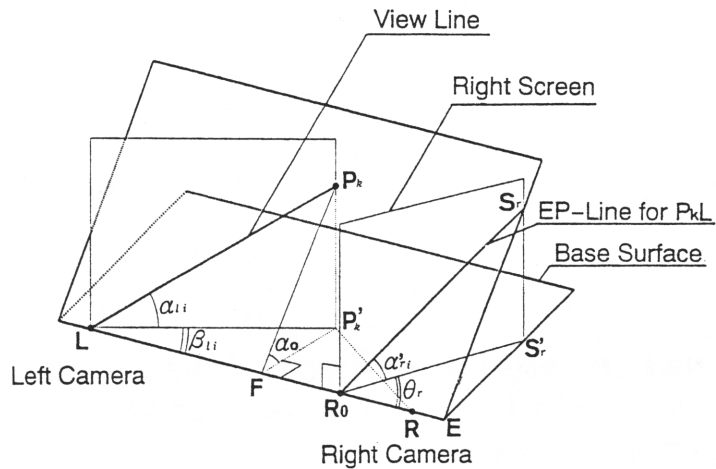
次の節2.1と2.2で、新しいステレオペアマッチング法と二値化画像データを用いた相互相関法による新しい三次元粒子追跡法について述べる。ここでは、流れの可視化手法の説明は省略する。

### 2.1 ステレオペアマッチング法

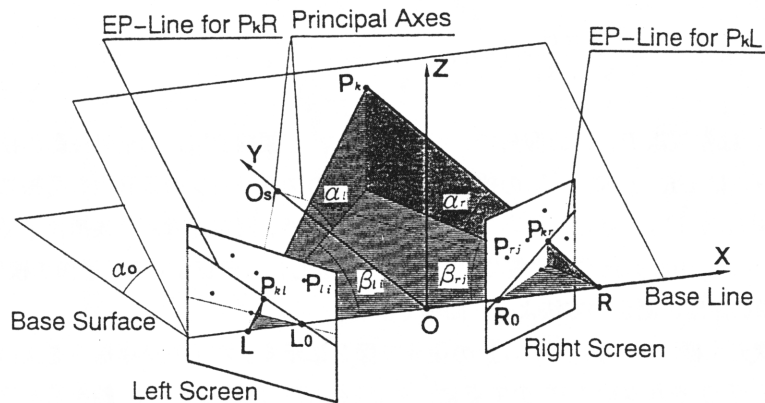
可視化された流れ場は、2台のビデオカメラで撮影される。その透視画面は球面上に接するように固定され、その2本の視軸は球の中心点 $O_c$ で交わる。両カメラのスクリーンは、両視軸が同一

の大円上の共通な一平面内に含まれるように配置される。両視線は、その上では共面をなす。両方の画像は、同じスケールで撮られる。

幾何学及びカメラパラメータを図1に示す。左右カメラの視点を各々  $L$  と  $R$  で表す。基本線  $LR$  の長さは、測定結果の全体的な精度に影響するため、高い精度で測定されなければならない。図1で、点  $P_k$  を三次元空間内のトレーサ粒子とする。左のスクリーンで、視点  $L$  と粒子  $P_k$  の画像点  $P_{kl}$  を結んだ線を視線と呼び、同様に線  $RP_{kr}$  も視線と呼ぶ。左側の視線  $P_k L$  の右のスクリーン上への透視投影線をエピポーラ線(略してEP線)と呼ぶ。ステレオペアとして対応する粒子像は右のスクリーン上のEP線上に存在するはずである。しかし、実際には、測定の不



(a) Geometry of epipolar line for viewline,  $LP_k$



(b) Geometrical and camera parameters

Fig. 1 Illustration of stereo pair matching

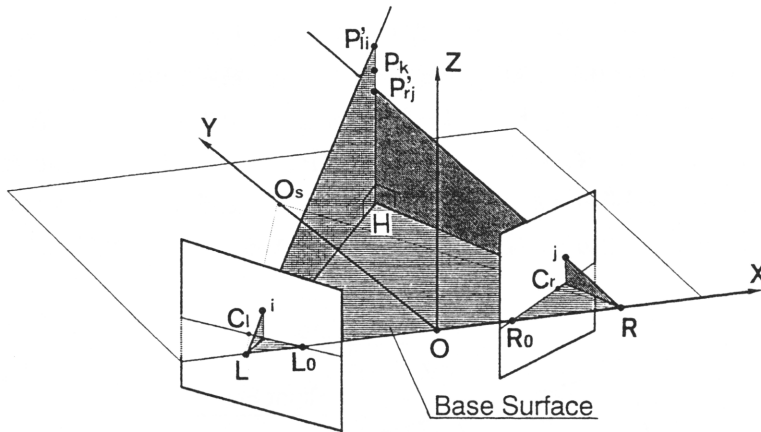


Fig. 2 Reconstruction of three-dimensional coordinates of a particle

確かさのために、対応する粒子像がEP線の近傍で検出されるであろう。EP線に最も近い粒子像の一つが、像  $P_{li}$  のステレオペアマッチングの最適な候補となるであろう。そして同じ方法で、2番目、3番目・・・等の最も近い候補が検出される。

EP線の算出および粒子像とEP線間の距離の算出のより簡単な方法が処理の計算時間を減らすであろう。一つの画面内のすべてのEP線がある定点(基本線  $LR$  と交わる透視投影点  $R_0$ )を通ることに注意すれば、EP線の勾配を与える簡単な式は幾何学関係により次のように導かれる。

$$\tan \alpha'_{ri} = \frac{\sin \theta_r}{\sin \beta_{li}} \tan \alpha_{li} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_{li}$  は左視線  $P_k L$  の仰角で、 $\beta_{li}$  は  $LR$  と視線  $P' L$  の垂直投影の挟角である。基準平面上で  $\theta_r$  は  $LR$  と  $R_0 S_r'$  の挟角である。左のスクリーンのEP線も同様に計算される。EP線の勾配  $\tan \alpha'_{ri}$  はこの段階で知られているので、固定点  $R_0$  と候補粒子像  $P_{rj}$  を結ぶ線の勾配  $\tan \alpha_{rj}$  の計算結果の比較による、最も接近したステレオ対応粒子像の検出方法は、EP線と候補画像の距離の測定の方法より、簡単である。

粒子の三次元座標 ( $X_k, Y_k, Z_k$ ) の復元を図2に示す。右手直交座標系を次のように定義する。即ち、原点  $O$  を基本線  $LR$  の中点に、 $X$  軸を  $LR$  に沿って、 $Y$  軸を基本平面上に、そして、それらに垂直に  $Z$  軸をとる。二つの視線は現実の測定では交わらないから、粒子  $P_k$  の位置は次に述べる近似的方法で決定される。左側の視線  $L_i$  を含む基本平面に垂直な平面と右側の視線  $R_j$  との交点を  $P'_{rj}$ 、右側の視線  $R_j$  を含む基本平面に垂直な平面と左側の視線  $L_i$  との交点を  $P'_{li}$  として、線分  $P'_{rj} P'_{li}$  の中点を粒子  $P_k$  の位置として決定する。したがって、粒子  $P_k$  の三次元位置は次式で決定される。



点  $C_{st}$  と交わる。実際には、計算の簡単化のために、仮想のカメラは、容器の壁から各粒子に対して決定されるべき  $O_x C_{st} = L_{st}$  でなく、近似的に式(3)の距離  $L_{fix}$  に置かれる。この簡単

$$L_{fix} = O_x C_{fix} = nL \quad (3)$$

化により生ずる測定誤差は、無視できる程度である。実際のスクリーン内の粒子の像を  $P_i$  で表し、スクリーン上の位置ベクトル  $O_c P_i$  の偏角を  $\theta$  で表す。 $\theta$  は次の式で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X} \right) \quad (4)$$

位置ベクトルの長さを  $e = (\sqrt{X^2 + Y^2})$  で表す。 $P_i$  に対応する点  $P_i'$  が仮想画面上にとられ、位置ベクトル  $O_c' P_i'$  の偏角が  $\theta$ 、ベクトルの長さが仮想スクリーン上で  $e' = e/n$  にとられる。点  $P_i'$  の座標  $(X', Y')$  は次式で与えられる。

$$(X', Y') = (e' \cos \theta, e' \sin \theta) \quad (5)$$

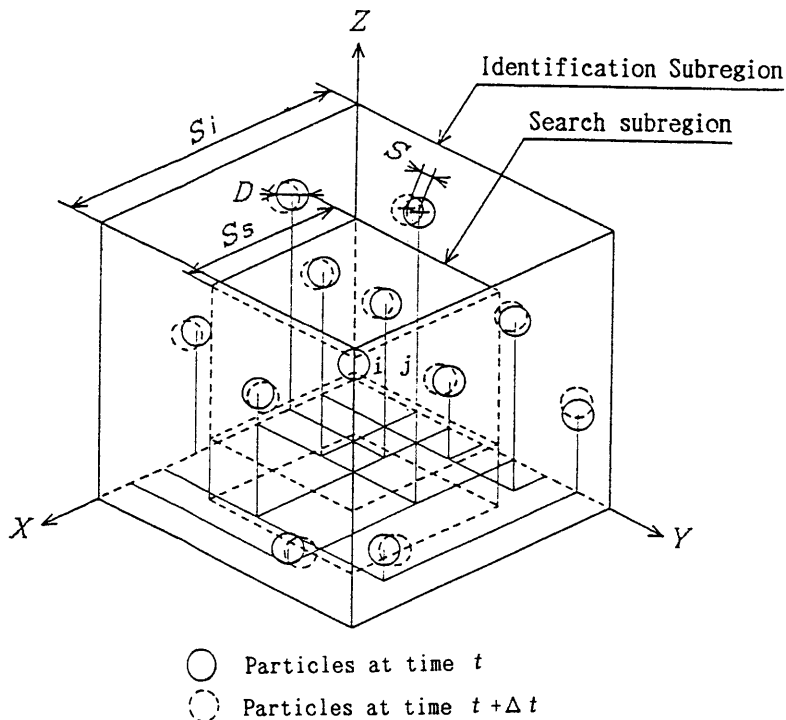


Fig. 4 Particle distribution in cubic identification subregion  $I$  and  $J$  when a reference particle  $i$  is overlapped with a candidate particle  $j$  at their centers.

上述と同様の方法で左右の両カメラの  $P_i'$  に対応する仮想座標を用いることにより、光の屈折の補正が可能となる。

### 2.3 粒子追跡のアルゴリズム

ここで、二つの連続画像の時間間隔は十分短くかつ固定され、流れ場の流速は時間と空間に対して急激な変化をしないこと、即ち、流れのパターンの類似性が保存されることを仮定する。

現在の問題は、時刻  $t$  の第1空間と時刻  $t + \Delta t$  の第2空間での各粒子の追跡方法、言い換えれば、各粒子を同定する方法である。その手順は次の通りである。(図4参照)

1) 辺長  $S_i$  を持つ立方体の捜査小領域は第2空間で設定され、その中心は第1空間の参照粒子  $i$  の中心と同じ座標をもつ。捜査小領域に含まれる粒子数を  $n$  で表わす。捜査小領域の全粒子を候補粒子  $j_m (m=1, 2, \dots, n)$  とする。

2) 第2空間の座標原点は引き続いて候補粒子  $j_m$  の中心に移され、それは参照粒子  $i$  と同じ座標を持つ。

3) 各々同じ辺長  $S_i$  を有する立方体の同定小領域は、第1および第2空間の両方で設定され、その中心は、粒子  $i$  の中心と同じ座標を持つ。粒子分布パターン  $I, J$  は、各々、第1および第2同定小領域内の粒子で構成される。粒子  $j_m$  に対する候補パターン  $J$  を  $J_m$  で表わす。

4) パターン  $I$  をパターン  $J_m$  に重ねた後に、重ねられたパターンの中で互いに重った粒子数  $N$  が数えられる。ここで、 $N$  は重った粒子のペア数と呼ばれる。

重ねられたパターンの中で任意に抽出された二つの粒子が式(6)(7)による条件を満たすならば、これらは、一つの重った粒子ペアと見なされる。ここで、計算の簡単化のために、トレーサ粒子の実際の球形輪郭は直径  $D$  の球で置き換えられる。このような球形粒子を仮想粒子と呼ぶ。

$$\begin{aligned} \Delta X &= |X_{i1} - X_{jm}| \\ \Delta Y &= |Y_{i1} - Y_{jm}| \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z &= |Z_{i1} - Z_{jm}| \\ S &= \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)} < D \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $X_{i1}, Y_{i1}, Z_{i1}$  は第1空間の中心粒子  $i$  を除いたパターン  $I$  の内で番号  $1$  なる粒子の座標である。 $X_{jm}, Y_{jm}, Z_{jm}$  は第2空間の中心粒子  $j$  を除いたパターン  $J$  の内で番号  $m$  なる粒子の座標である。

5) 次式(8)で定義される相互相関係数  $C_{ij}$  の値は二つのパターン  $I, J$  に対して計算される。

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N \left( 1 - \frac{3}{2} \overline{S_k} + \frac{1}{2} \overline{S_k^3} \right)}{\sqrt{N_i N_j}} \quad (8)$$

ここで、 $N_i$  は中心粒子  $i$  を除いたパターン  $I$  の粒子数であり、 $N_j$  は中心粒子  $j$  を除いたパターン  $J$  の粒子数である。 $N$  と添字  $k$  は、各々粒子  $i$  と  $j$  を除いた重なったペアの数とその番号である。 $\overline{S_k} = S_k / D$  ,  $0 \leq \overline{S_k} \leq 1$  である。

上式(8)は、式(9)に示す相互相関係数の数学的定義より、二値化画像データを用いたパターン  $I$  の粒子の総体積、パターン  $J$  の粒子の総体積、二つのパターン内で重なった仮想粒子ペアの重なった総体積の計算から導かれる。

$$C_{I,J} = \frac{\int f(x, y, z) \cdot g(x, y, z) dV}{\sqrt{\int \{f(x, y, z)\}^2 dV \cdot \int \{g(x, y, z)\}^2 dV}} \quad (9)$$

ここで、パターン分布関数  $f(x, y, z)$  と  $g(x, y, z)$  は二値化データとる、即ち、粒子の内側で1、粒子の外側で0をとり、仮想粒子の直径は定数  $D$  であることを仮定する。

6)ステップ 2)～ 5)は、値  $N$  と値  $C_{I,J}$  の双方が全ての候補粒子に対して計算されるまで、繰返される。全ての候補パターンについて重なった粒子ペア数の計算の後、どの候補パターンが  $N$  の最大値  $N_{max}$  をとるかを決する。もし、 $N$  の最大値  $N_{max}$  をとるパターンが一つしかないならば、その候補粒子は正しく同定されたものと考えられる。もし、二つ以上のパターンが  $N_{max}$  をとれば、これらの中で  $C_{I,J}$  の最大値をとるパターンに対応する候補粒子が、正しく同定されたものとみなされる。最大値  $N_{max}$  がゼロの時、参照粒子  $i$  は同定の計算から除外される。このようにして除外された粒子の数を  $N_{ex}$  と書く。

### 3 実験結果

#### 3.1 ステレオペアマッチング法の性能

新しいステレオペアマッチング法の性能を調査するために、直径0.5mmの小さい斑点を分布させたモデルプレートが使用された。図5で示すようにモデルプレートは高精度な駆動システムにより、Y 軸に移動することができ、直径910mmの地球に固定された2台のカメラにより撮影される。モデルプレートが空気中や水中である二通りの場合について、三次元座標の復元に及ぼす光の屈折の補正の影響を予備的に調査した。スポットの  $X, Y, Z$  座標は前もって高い精度で知られている。

カメラ設定の据付け誤差は、ステレオペアマッチングの処理において確認済みのステレオペアを用いて統計的に修正され、評価される。斑点の座標は、上述と同様の方法のステレオペアマッチング法で復元される。

図6(a)と(b)は、光の屈折の補正を加えない場合と加えた場合の、ステレオペアマッチング法の性能試験の結果を示したものである。空気中と水中についてこれらの二つの場合の距離のずれの平均値  $\overline{\Delta S}$  は次の通りであった。

$$\overline{\Delta S} = 1.84\text{mm} \quad \text{光の屈折を補正しない場合。}$$

$$\overline{\Delta S} = 0.51\text{mm} \quad \text{光の屈折を補正した場合。}$$

更に、Y 座標の平均値として909.96mmが得られ、その標準偏差は0.185mmであった。

この結果より、光の屈折を補正した本ステレオペアマッチング法による三次元座標の復元の性能は、満足できるものであるといえる。



### 3.2 3D PTV による速度計測

二値化データに基づく相互相関法による3D PTVを、底吹き気泡噴流による円筒容器内の気液二相流に適用した。

図7には実験装置の概要が図式的に示されている。円筒容器は直径200mm、深さ280mmの透明なアクリル管で作られていて、その中には水が満たされている。光の屈折が画像に及ぼす影響を避ける

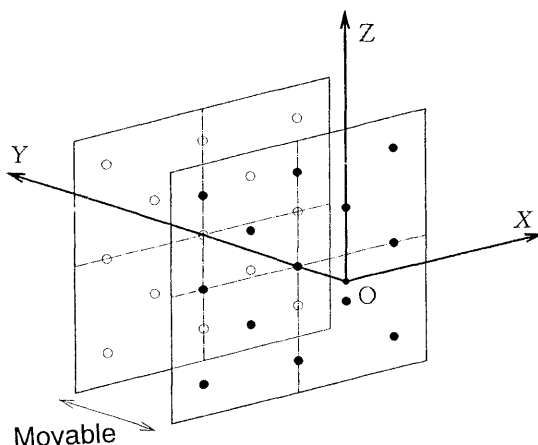


Fig. 5 Model plate for stereo pair matching performance

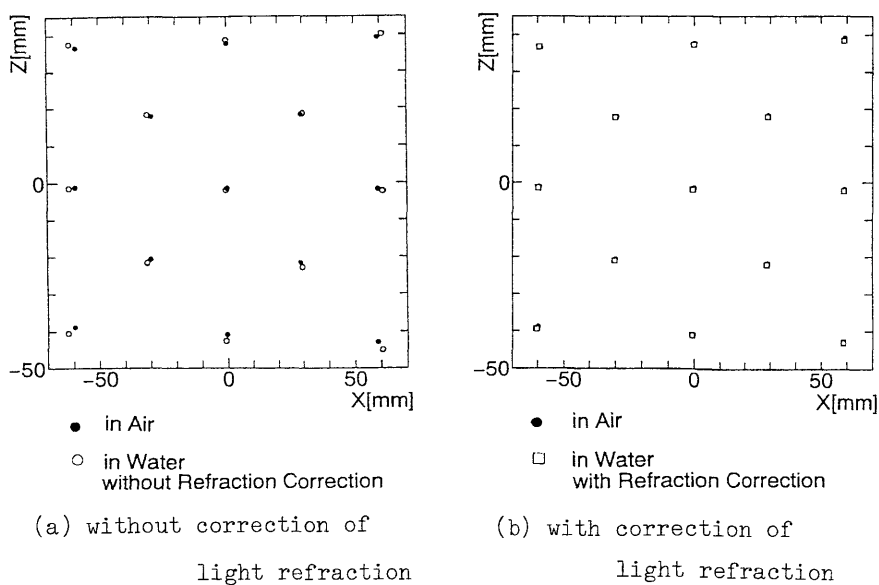


Fig. 6 Test results of stereo pair matching performance test

ために、その円筒容器は透明なアクリル製の水ジャケットで囲まれている。気泡は円筒容器の底に設定されたノズルから垂直に噴出され、その空気流量は $1.44\text{cc/s}$ である。測定領域の体積は $100\text{mm}$ 立方であり、 $650\text{W}$ のスライドプロジェクター用の光源システムにより照明される。直径 $0.9\text{mm}$ で比重 $1.02$ なるナイロン12の球が、流れの可視化のトレーサーとして容器内に注入される。水と粒子の比重が同じになるように、水にはいくらかの塩が溶かされている。それで、粒子は静水中では中立的に浮遊する。粒子の運動は2台のCCD型のビデオカメラで撮影され、3D PTVにより解析

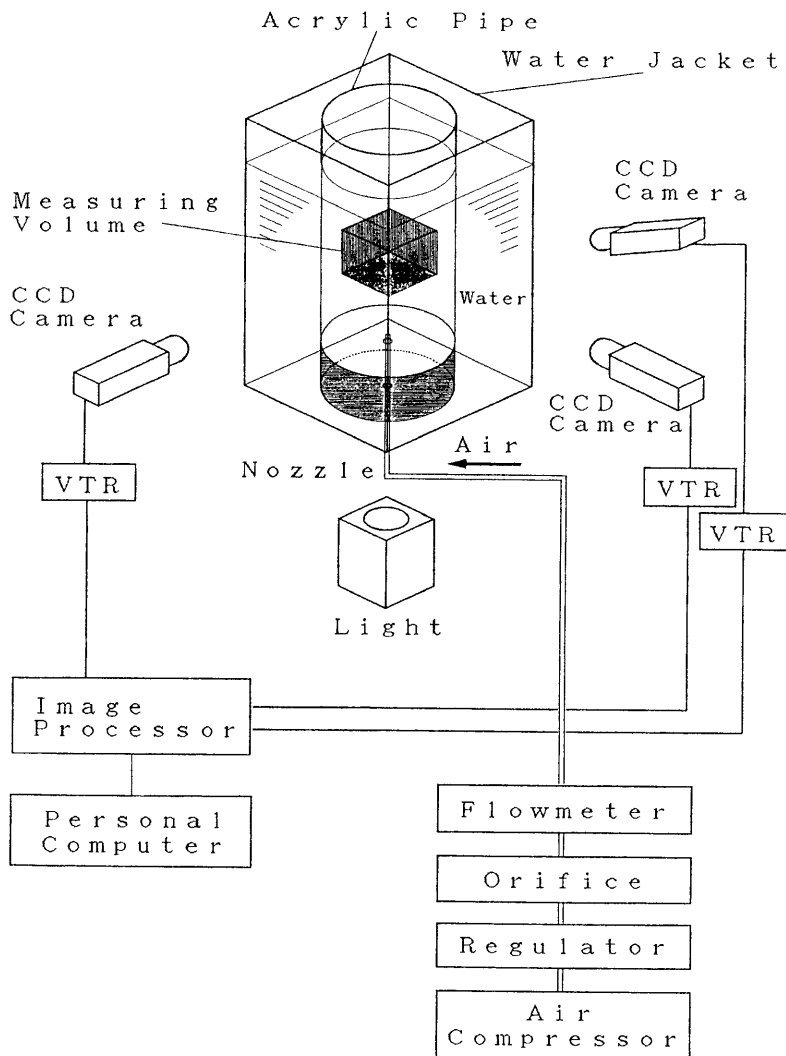


Fig. 7 Outline of experimental apparatus

される。

図8は円筒容器における気泡噴流混合流れの気液二相流を可視化した流れ場を示している。トレーサー粒子の流跡線は、スリットを通して照明され露出時間0.5secでカメラにより撮影された。強い渦輪が容器上部で観察され、気泡は容器内で水を攪拌及び混合する。

図9は容器の底に設定されたノズル近傍の流れの写真である。それは、水ジャケットの壁面に固定されたカメラにより撮影された。観察領域は、厚さ約10mmのスリット光で照明された。ノズル出口では、最初、気泡の形状は球である。それは間もなく、上半分が半球の下半分が水平方向に平たい円盤形のマッシュルーム形状に変形される。その後、マッシュルーム形状は完全に平たい円盤となり、気泡はジグザグ軌道を取りながら上昇する。各々の気泡の軌跡は、それぞれ異なる。高速ビデオ画像による観測によれば、気泡から離れた粒子は気泡より低速で動くが、気泡に極めて近くてその運動の前方の粒子は気泡とほとんど同じ速度で動く。

著者らは、以前に相互相関法による2D PTVを用いた流れ場の研究を行った<sup>(13)(14)</sup>。そし



Fig. 8 Visualization of flow field in a bubbling jet mixing water vessel

て、Hassanらは2D PTVに対しpoint-by-pointデジタル相互相関解析アルゴリズムを用いて、二相流の両相の速度を測定した<sup>(15)</sup>。両研究ともに、上昇気泡の運動により導かれる水の速度変動について述べている。本論文においては、三次元速度ベクトルの測定結果を図10に示す。この図より、速度ベクトルの数がそれほど多くないにもかかわらず、気泡の運動の前方の水は非常に高速で上昇し、その後方の粒子の運動から水は気泡の跡を埋めるように巻き込まれていくことが観察される。

#### 4 結言

本論文は、水と空気の境界における光の屈折の影響を補正し、水中の粒子の三次元座標を2台のカメラの画像から決定する新しいステレオペアマッチングの方法と、二値化データを用いた粒子画



Fig. 9 Bubble deformation and tracer particle motion

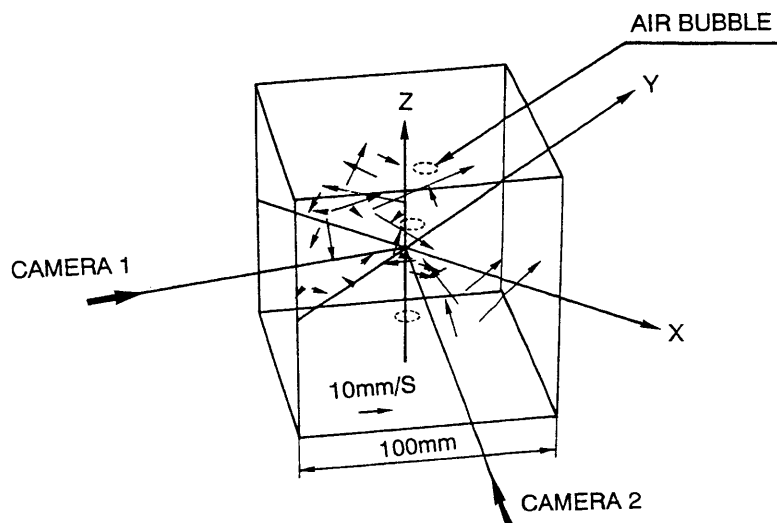


Fig. 10 Three-dimensional velocity vectors of tracer particles in a bubbling jet mixing water vessel

像追跡計測に対する新しい三次元相互相関法を提案した。新しい3D PTVは円筒容器内の気泡噴流混合流れの気液二相流の速度場の計測に適用された。結果として、気泡のまわりの水の運動が明確に説明された。

## 5 文献

- (1) 篁源亮, トレーサー画像の相関処理による流速計測, 流れの可視化, 3-10, pp.189-192, (1983).
- (2) Kimura, I. and Takamori, T., Image Processing of Flow Around a Circular Cylinder by Using Correlation Technique, *Proc. 4th Intl. Symp. on Flow Visualization*, Paris, Hemisphere Publishing Corp., pp.221-226, 1989.
- (3) 小林敏雄, デジタル画像処理による流れ場解析システムの開発, 科研報告書 pp. 63-66, (1988).
- (4) Kaga, A. and Yoshikawa, A., Velocity Distribution Measurement through Digital Image Processing of Visualization Flow Image, *Building Systems, Room Air and Air Contaminant Distribution*, Edited by L.L.Christianson, ASHRAE, pp. 91-96, 1989.
- (5) Kaga, A., Inoue, Y. and Yoshikawa, A., Velocity Distribution Measurement through Digital Image Processing of Visualized Flow Images, *Proc. of Second Intl. Conf., ROOMVENT'90*, pp.(22)1-15, 1990.

- (6) Chang, T.P.K., Watson, A.M. and Tatterson, G.B., Image Processing of Tracer Particle Motions as Applied to Mixing and Turbulent Flow-1. The Technique, *Chem. Eng. Sc.*, Vol. 40, No. 2, pp. 269-275, 1985.
- (7) 植村知正, 長谷川泰章, 速度分布測定のための流れの可視化画像の高速処理法の開発, 流れの可視化, 7-Suppl., pp. 11-14, (1987)
- (8) 植村知正, パソコンシステムを用いた画像解析による二次元流れ場の実時間速度測定法, 流れの可視化, 8-Suppl., pp. 77-80, (1988)
- (9) 植村知正, 山本富士夫, 幸川光雄, 二値化相関法-粒子追跡法の高速画像解析アルゴリズム-, 可視化情報, 10-38, pp. 196-202, (1990).
- (10) 植村知正, 水越渉, 靄崎展, 辻本良信, 相関画像解析法における粒子の誤対応に対する処理, 流れの可視化, 9-Suppl., pp. 35-38, (1989)
- (11) Uemura, T., Yamamoto, F. and Ohmi, K., A High Speed Algorithm of Image Analysis for Real-time Measurement of Two-dimensional Velocity Distribution, "*Flow Visualization*", ASME FED-85, pp. 129-133, 1989.
- (12) 西野耕一, 笠木伸英, 平田賢, 佐田豊, 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 機械学会論文集(B), 55-510, pp. 404-412, (1989).
- (13) 植村知正, 井口学, 山本富士夫, 森田善一郎, 水越渉, 水-空気系底吹き気泡により攪拌される円筒容器内流れの画像解析, 鉄と鋼, 78-5, pp. 738-744, (1992).
- (14) Uemura, T., Ohmi, K., and Yamamoto, F., Mixing Flow in a Cylindrical Vessel Agitated by a Bubbling Jet, *Proc. 5th Appl. Laser Tech. to Fluid Mech.*, No. 18-6, pp. 1-5 (1990).
- (15) Hassan, Y.A., blanchat, C.H., Seeley JR, C.H. and Canaan, R.E., Simultaneous Velocity Measurement of Both Components of a Two-Phase Flow Using Particle Image Velocimetry, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 18, No. 3, pp. 371-395, 1992.